

効率評価法の検討 —剣道の「跳躍素振り運動」の特性—

坂 神 通 良 (愛知教育大学大学院研究生)

鬼 頭 伸 和 (愛知教育大学)

寺 澤 健 次 (愛知教育大学)

鳥 海 清 司 (富山大学)

Analysis of Estimation of Efficiency : The qualifies in “Jump—swinging exercise” of kendo

Michiyoshi SAKAGAMI

Nobukazu KITO

Kenji TERASAWA

Seiji TORIUMI

はじめに

身体運動の巧みさを示す指標として、「効率」と言う概念がある。これは運動の経済性を考える上で、古くは労働科学、現在では、人間工学の分野においても研究がなされている。

効率の研究は、歩行の効率⁴⁾⁸⁾、走の効率⁴⁾⁸⁾、サイクリングの効率⁶⁾、ボート漕ぎの効率³⁾⁵⁾、泳ぎの効率¹⁰⁾、ボールキックの効率²⁾など、多種多

様な研究報告がある。しかし、効率の値についての報告は、数%~数十%の範囲にあり、動作によって様々である。その原因として、効率を評価する方法の違いがあげられる。ベースライン（効率計算上の分母となるもの）と、仕事の評価がそれである。また、運動の種類により仕事の評価法は異なり、金子らは、ランニングの効率について、重心移動の外的仕事と肢運動の内的仕事の和をもって評価する方法を用いている。それに対して、W

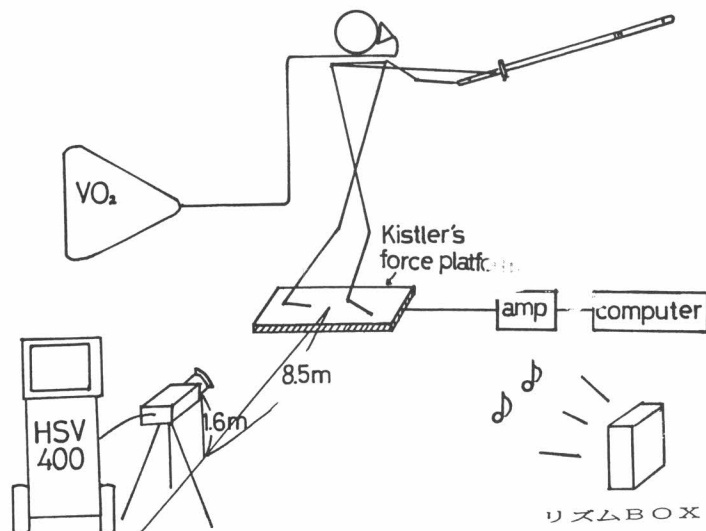


図1 実験構成図

inter¹⁴⁾やPierrynowski¹³⁾らは、フィルム分析により身体分節間に完全なエネルギー転移があると仮定した計算法を用いている。この方法は、フィルム撮影をするだけで、比較的容易に、ダイナミックな身体運動の仕事量を算出できるという利点から、ランニング時の仕事量の見積り以外にクロスカントリースキーなどの仕事量の見積りなどにも応用されている。¹¹⁾しかし、人間の身体は、多分節から構成されており、それらが相互に複雑な動きをするため、はたしてこの評価法が最良であるかどうか問題は残っている。

本研究においては、剣道の「跳躍素振り運動」の効率を指標にして、その動作の特性を明らかにするとともに、評価方法を比較検討し、効率評価法の基礎資料を得ることを目的とした。

研究方法

被験者は、健康な男子大学生計10名とした。

<対象動作>

剣道の「跳躍素振り運動」は、右足、左足を前後に2回入れかえて跳躍をする間に、竹刀を前方から後方に振り上げ、そして、後方から前方に振り下ろす一連の動作である。跳躍素振り動作を対象としたのは、実際に面を打つ場合にインパクト時に竹刀の急激な減速がおきる。後述する平滑化処理法で解析すると、竹刀の加速局面におけるエネルギー等の運動力学的データにも歪が生じることが考えられるからである。

<実験手順>

実験の構成図は、図1に示した。

被験者は、10分間の椅座位の姿勢で安静（安静時の代謝量測定）をとり、その後、60回/分、70回/分、80回/分、最大努力によるMAX（平均97.1）回/分のそれぞれのピッチで1分間の「跳躍素振り運動」を行った。そして、運動終了後10分間椅座位の姿勢で安静にしていた。回復時間は、浅見ら²⁾の実験方法と同様にした。また、「跳躍素振り運動」の効率を2通りの仕事量の評価法を用いて算出し分析した（注：測定項目参照）。さらに、「跳躍素振り」の特性として効率とピッチの関係性を求めた。

<測定項目>

(a)酸素摂取量の測定：安静時（運動前10分）、運動中（1分）及び回復時（運動後10分）の呼吸をダグラスバックで採集し、瞬時ガス分析器（1H-21、日本電気三栄製）を用いて解析した。運動中はダグラスバックをリュック様式で背中に背負って、呼吸ガスを採集した。動作の妨害にならないように二方コックの固定を工夫した。また、瞬時ガス分析器は、更正ガス（O₂14.9%、CO₂5.01%、日本酸素）と空気（O₂20.9%、CO₂0.03%）とで、呼吸ガスの分析前と分析中に適宜更正を行い、分析の正確性に注意した。ダグラスバックは、実験前に空気で充満させ、一定の重りを用いて空気のもれがないことをチェックした。

(b)機械的仕事量の測定：運動中の機械的仕事量を次のような2通りの方法で求めた。

b-1) 床反力計からの機械的仕事量

床反力計（キスラー社製）から、運動中の身体重心の機械的仕事量Wを、

$$W = M \cdot g \cdot \Delta H$$

として求めた。（M；身体質量、g；重力加速度、ΔH；身体重心の上昇高）

b-2) VTR撮影からの機械的仕事量

側方8.5mよりnac社製のハイスピードビデオカメラ（HSV-400）で200コマ/秒のシャッタースピードで撮影した。竹刀の重心の位置変化は、予め竹刀にマークされた先端部および柄頭部の座標値をXYコーディネーター（V-78-J Nac社製）を介し、コンピューター（PC-9801VX）に記録して求めた。竹刀の速度、加速度、角速度は、各点のX座標、Y座標、竹刀の角度の各データ列を数値微分して求め、さらに遮断周波数20Hzのデジタルフィルターを用いて平滑化を行った。竹刀の力学的エネルギーは、得られた運動力学変量（時系列データ）より、次のように求めた。ある瞬間の竹刀の力学的エネルギー（TE_i）は

$$TE_i = PE_i + KE_i + RE_i$$

$$= |mgh_i|^2 + |1/2mv_i|^2 + |1/2Iw_i|^2$$

（TE；total segment energy、i；時間（film frame）、PE；potential energy、KE；translational kinetic energy、RE；rotational kinetic energy、m；竹刀の質量（0.51kg）、v；竹刀の速度、|；竹刀の重心点回りの慣性モーメント、w；竹刀の

角速度)とした。

さらに、竹刀の力学的エネルギーから、竹刀が発揮した仕事量 (W) を

$$W = \sum_{i=1}^n (|PE_i - PE_{i-1}| + |KE_i - KE_{i-1}| + I RE_i - RE_{i-1}|)$$

とした。 (time samples(frames))

b-3) 効率 (Efficiency) の算出法

本研究においては、効率をNet E (安静時のエネルギー消費量を運動中のエネルギー消費量から差し引いて仕事量を除す) から算出した。

$E = \text{機械的仕事量} \cdot 100 / (\text{運動時エネルギー代謝量} - \text{安静時エネルギー代謝量})$

なお、エネルギー代謝量は、酸素消費量1ℓについて2153 Jの換算率を用いて求めた。

結果及び考察

1) エネルギー消費量について

「跳躍素振り運動」の1振り当りのエネルギー消費とピッチとの関係において、その動作の消費量は、80回/分のピッチの時に $0.67 \pm (0.11)$ ml/kg/minで、極小値がみられた。これは、エネルギー消費の観点のみから考えると、この運動では、80回/分のピッチの時に至適速度が存在することを示唆している (図2)。

筋運動の速度と効率の関係について、酸素摂取

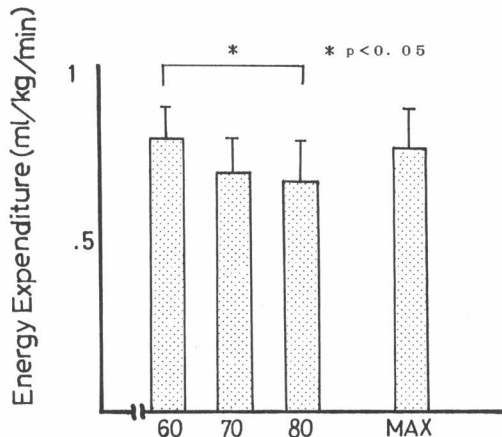


図2 1振り当りの「跳躍素振り運動」におけるエネルギー消費量

量の多寡を目安とした至適速度(optimum speed)が、労働科学の分野で古くから研究されている。本実験と運動様式は異なるが、歩行について¹⁾は、階段登行の至適テンポが1.3秒に1歩としたもの⁷⁾、歩行の至適速度が61m/分としたもの¹²⁾などがある。また、サイクリングでは、40回/分の回転速度の時に仕事量1000kgm当りの酸素摂取量で最小値がみられたとしたものがある。この至適速度は、筋のもつ力学的特性に基づくもので、筋線維の内部に強い粘性抵抗があるので、早い収縮や伸展では大きい内部抵抗を生ずるわけでエネルギー損失の占める割合が多い。逆に速度が遅すぎると、筋のスプリングの働き(弾性エネルギー)が低下するものと思われる。以上のように、歩行やサイクリングにおいて至適速度の存在は明かであるが、本実験での「跳躍素振り運動」においても、連続的に跳躍しながら竹刀を振るという、筋肉の収縮・弛緩によってなされるリズムカルな動作であり、最小のエネルギー消費で仕事を遂行しうる作業速度があると考えられる。合理的な運動の特性を究明することに利用できるものと考えられる。

2) 仕事量について

「跳躍素振り運動」の1振り当りの仕事量については2通りの算出法を用いた。床反力から求めた仕事量は、60回/分のピッチの時に $108.7 \pm (8.1)$ J、max回/分のピッチの時に $48.5 \pm (5.7)$ Jで、「跳躍素振り運動」のピッチが速くなるにつれて減少する傾向を示した (表1)。これは、この算出法による仕事量では、単位時間毎の荷重値と移動距離を積分して求めたために、「跳躍素振

表1 1振り当りの「跳躍素振り運動」において床反力から求めた仕事量

Frequency (回/分)	60	70	80	MAX
External Work (J)	108.7 (8.1)	88.61 (6.0)	71.1 (2.6)	48.5 (5.7)
Values are Mean ± (S.D.), ***; P<0.001				

り運動」のピッチが速くなるにしたがい、跳躍時の身体重心の移動距離が小さくなり、床反力に発揮された外的仕事量が減少したためと思われる。またこの床反力から算出した仕事量とエネルギー消費量の相関を見ると、エネルギー消費量が増加するにしたがい、仕事量が減少するという負の相関 ($r = -0.68$, $P < 0.001$) が得られた (図3)。

竹刀が発揮した仕事量では、60回/分のピッチの時に $45.6 \pm (8.2)$ J、max回/分のピッチの時に $72.8 \pm (8.0)$ J で、「跳躍素振りの運動」のピッチが速くなるにつれて増加する傾向が示した (表2)。また、エネルギー消費量との相関を見てみると、エネルギー消費が増加するにしたがい、仕事量も増加する正の相関 ($r = 0.73$, $P < 0.001$) が得られ、床反力から求めた仕事量と全く逆の結果となった (図4)。

以上のことから、床反力から求めた仕事量は、本実験対象動作に限り、身体重心の運動は反映さ

れているが、上肢の動きが反映されないことを意味していると考えられる。一方、竹刀から求めた仕事量は、体全体の運動のエネルギー量を見ているのではないが、エネルギー消費量と正の相関があることから、ある程度、「跳躍素振り運動」の特性を評価しているのではないかと推察される。

表2 1振り当りの「跳躍素振り運動」において竹刀のエネルギー変化量から求めた仕事量

Frequency (回/分)	60	70	80	MAX
External Work (J)	45.6 (8.2)	52.2 (8.1)	56.4 (10.5)	72.8 (8.0)

Values are Mean \pm (S.D.), * ; $P < 0.05$, ** ; $P < 0.01$, *** ; $P < 0.001$

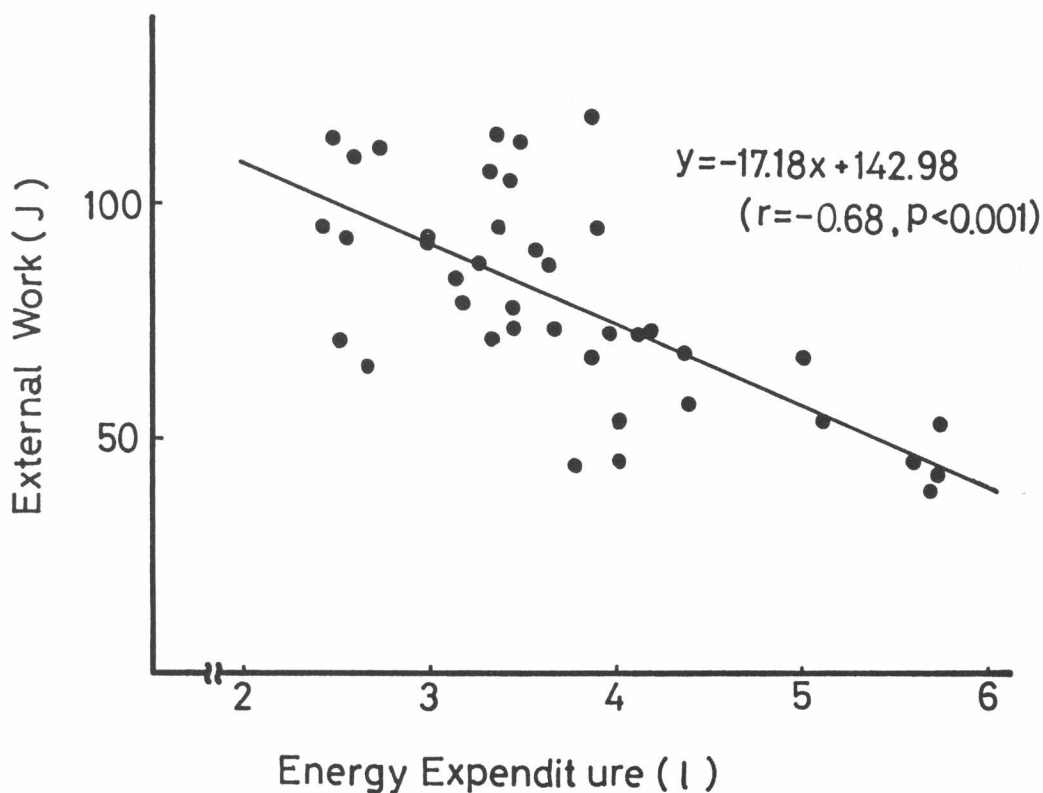


図3 「跳躍素振り運動」のエネルギー消費量と床反力から求めた仕事量の関係

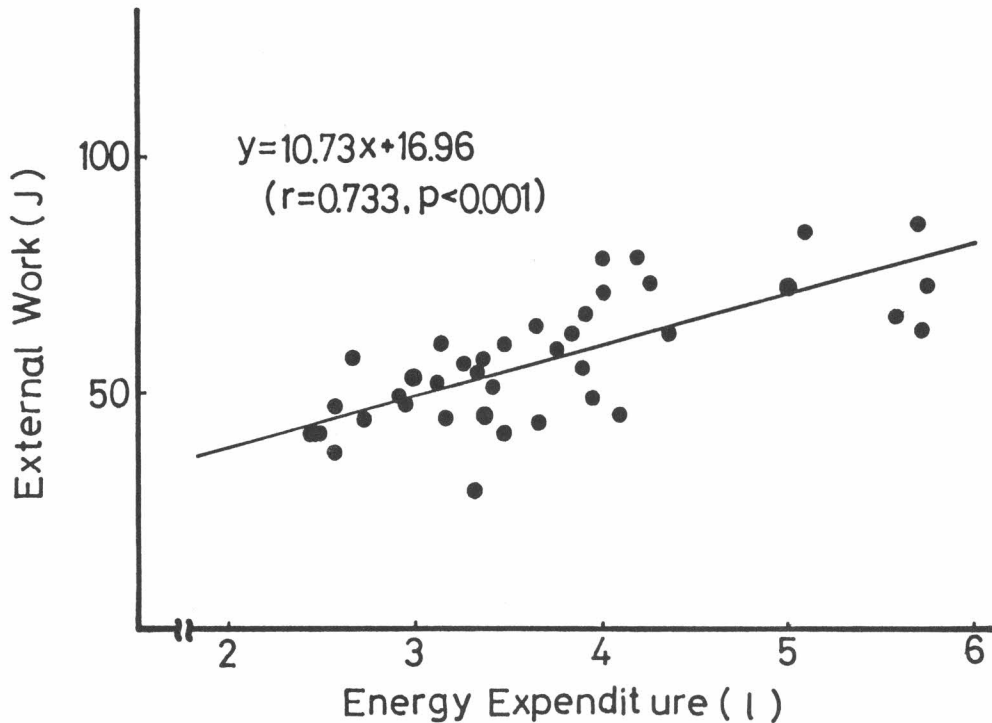


図4 「跳躍素振り運動」のエネルギー消費量と竹刀が発揮した仕事量の関係

以上のことから、エネルギー消費量との関連からは、竹刀が発揮した仕事量による評価の方が、この運動の特性を見る上で適切だと思われる。

3) 効率について

本実験の「跳躍素振り運動」においては、床反力から求めた仕事量に基づく効率は、約4.5～10%であった(表3)。また、竹刀がなした仕事量に基づく効率は、約4～7%であった(表4)。この値は歩行^{4) 8)}やランニング^{4) 9)}と比較して、かなり低い。これは、仕事量の評価の影響によるものである。床反力から求めた仕事量は、竹刀と竹刀を調整している上肢の動きが反映されていない。一方、竹刀がなした仕事量は、運動によって生じた竹刀の動きだけを見て、体全体の動きをとらえていない。これらの理由により今回の対象動作は、真の効率の値を過小評価している可能性があり、その値はもう少し高い値であることが推察される。

効率とピッチの関係について、床反力から求めた仕事量から算出した効率とピッチの関係は、ピッ

チが速くなるにつれて効率は減少した。一方、竹刀が発揮した仕事量から算出した効率とピッチの関係は、ピッチが速くなるにつれて効率は増加した。この結果は、ピッチと2通りの異なった方法で算出した仕事量の関係が顕著に反映したものである。これらのことは、「跳躍素振り運動」の効率の評価において、仕事量の算出方法が、いかに関与しているかを示唆するものである。

表3 「跳躍素振り運動」の床反力から求めた仕事量に基づく効率

Frequency (回/分)	60	70	80	MAX
Efficiency (%)	9.9 (1.6)	9.3 (1.7)	7.8 (1.4)	4.5 (.7)

Values are Mean \pm (S.D.), * ;P<0.05, *** ;P<0.001

表4 「跳躍素振り運動」の竹刀のエネルギー変化量から求めた仕事量に基づく効率

Frequency (回/分)	60	70	80	MAX
Efficiency (%)	4.1 (.7)	5.4 (.6)	6.1 (1.0)	6.9 (.9)

Values are Mean \pm (S.D.), ** ;P<0.01, *** ;P<0.001

Significance markers: ** between 60 and 70; *** between 60 and 80; ** between 70 and 80; ** between 80 and MAX.

まとめ

本研究では、動作の効率という観点から剣道の「跳躍素振り運動」の特性を明かにし、また、その動作の効率評価方法の検討をして、以下の結果が得られた。

1) 「跳躍素振り運動」の1振り当りのエネルギー消費量は、80回/分のピッチで、極小値が得られた。

2) 「跳躍素振り運動」の1振り当りの仕事量を、床反力から求めた仕事量と、竹刀が発揮した仕事量の2通りから算出し、それぞれエネルギー消費量との間で、床反力から求めた仕事量では負の相関($r = -0.68$)が得られたのに対し、竹刀が発揮した仕事量で正の相関($r = 0.73$)が得られた。

3) 「跳躍素振り運動」の効率は、床反力から算出した値は約4.5~10%、竹刀が発揮した仕事量により算出した値は約4~7%であった。また効率では至適速度がみられなかった。

以上のことから、エネルギー消費量との関連により、「跳躍素振り運動」では至適速度が存在し、また、この運動の特性を見る上では、効率の評価を実施すると、竹刀が発揮した仕事量による評価の方が適切であることが示唆された。

参考・引用文献

- 1) 阿比津 邦夫著、歩行の科学、不昧堂出版(1975)
- 2) Asami, t., et al:Energy efficiency of ball kicking. In:Biomechanics V-B. University Park Press(1975)
- 3) Asami, t., Yamamoto, K., Matsuo, A.

and Fukunaga, T.:Some biomechanical factors of rowing performance.:Biomechanics IX-B, Human Kinetics, Champaign, 477-480(1985)

- 4) Cavagna, G and M. Kaneko:Mechanical work and efficiency in level walking and running, J. Physiol, 268:467-481(1977)
- 5) Di Prampero, P. E., Cortili, G., Celenzano, Fand Ceretelli, P:Physiological aspects of rowing, J. Appl. Physiol. 31, 853-857(1971)
- 6) Kaneko, M. and T. Yamazaki:Internal mechanical work due to velocity changes of the limb in working on a bicycle-ergometer, Biomechanics VI-A:86-92. (1978)
- 7) Lupton, H:An analysis of speed on the mechanical of human muscular movement, J. Physiol, 57:337-353(1923)
- 8) Margaria, R 著(金子 公有)、身体運動のカネルギー、ベースボールマガジン社、(1978)
- 9) Margaria, R, R., Cerretelli, P., Aghe mo and G. Sassi:Energy cost of running, J. Appl. Physiol. 18:367-370(1963)
- 10) 宮下 充正、水泳の科学~キネオロギと指導への応用~, 杏林書院(1970)
- 11) Norman, R., Ounpuu, S, Fraser, M and Mitchell, R:Mechanical power output and estimated metabolic rates of nordic skiers during olympic competition,International Journal of Sport Biomechanics, 5, 169-184(1989)
- 12) 奥山美佐雄「無負荷歩行の瓦斯代謝」労働科学、10:162-179(1933)
- 13) Pierrynowski, M. R., Norman, R, W. and Norman R. W: Mechanical energy transfer in treadmill walking, Ergonomics, 23:p147-156(1980)
- 14) Winter. D. A:A new definition of mechanical work done in human movement, J. Appl. Physiol.46, 78-83(1979)